

# DTM在公路设计中的应用\*

黄桂兰

## 摘要

经济建设的发展必然对公路建设的发展规划、测设手段、装备等提出变革的要求。加快公路设计速度主要靠自动化，而地形资料的数字化（即数字地面模型DTM）是公路设计自动化的不可缺少的工具。本文建立了在取样及数据处理上始终考虑到公路设计及线型工程特点的DTM；编制了人-机配合设计纵断面程序，计算各种地质类型的土、石方程序，利用计算机联绘图机绘制任意长度的纵断面图、平面图、指定桩号的横断面图、透视图绘制程序，并用实际资料验证了程序的正确性。研究与试验表明：DTM用于公路设计不仅可行，且大有潜力可挖。

**【关键词】** 数字地面模型；纵断面；横断面；透视图

## 引言

传统公路设计方法不仅需要大量的费时费力的野外勘测工作，而且还不可避免地存在下面几个缺陷：

1. 所形成的方案不是经济、技术上的最优方案；
2. 方案受人的主观影响较大；
3. 工作强度大，设计工作繁琐。

采用“劳动密集+体力+经验”的传统公路设计方式是不能满足我国公路建设发展规划要求的。公路运输发展规划要求是：在“七五”期间年均新建公路1.2万公里；1990~2000年间，年均新建公路2.8~3.5万公里。而目前全国3个部属院和除台湾省外的30个省（市）自治区设计院，年勘察设计能力仅约为7600公里，这样仅“七五”期间每年将欠帐4400公里，后10年则每年欠帐2.7万公里。可见要完成任务，就必须采用高效能的技术，其中包括将计算机及数字地面模型（Digital Terrain Model，简写为DTM）等引入公路设计中。

收稿日期：1988-08-29

\*本文为硕士论文的一部分，指导教师为朱肇光副教授。

本文根据公路设计的特点，建立了公路设计所需的 DTM。在取样及数据处理上均顾及了公路是线形工程的特点，编制了平面曲线数字化、人-机配合设计纵断面、横断面设计处理、土石方计算及透视图的一系列程序。下面分别予以介绍。

## 1 公路设计中 DTM 的建立

公路设计可分为定位分析、初步设计和最后（也称详细、施工、技术）设计 3 个主要阶段。目前人们普遍认为在初步设计阶段 DTM 应用范围最大，故本文讨论的问题主要是针对公路初步设计阶段的。

为计算方便起见，在建立公路设计带状（这是线形工程中普遍使用的）DTM 时，采用分段建立的方式。分段的条件为：

1. 受计算机内贮量限制，当路线较长时，应适当予以分段；
2. 在设有桥梁、隧道处要分段，桥梁和隧道的工程费用单独核算；
3. 考虑到计算的方便，在遇有较复杂的曲线处分段。

对路线进行必要的分段后，就可一段段地分别处理，亦即分段建立 DTM。段与段之间所建立的 DTM 应有一定的重叠度，以保证待插高程点无一处于所有 DTM 的边缘，从而保证内插精度不会因点所处位置不同而有明显差异。

为公路工程而建立的 DTM，是沿着线路方向中心线，且宽度超过路面宽的带状式的，在逐次改定线路中应能便于求得纵、横断面上的地形信息。DTM 的建立目的在于能自动或半自动地求得最佳路线的设计。

建立 DTM 的主要步骤是获取数据和数据处理。

本文所作的试验是从比例尺为 1:2000 的现有地形图上以边长为 5 毫米（图上）进行人工采样而获得的。（所获资料仅是现有地形图，未得到其它诸如航测象片等资料。）为以后处理的方便，以路线段的大体方向为 Y 轴，采样点随路中心线的变化而作相对于 Y 轴的适当调整，从而基本保证路中心线始终居于线形 DTM 的中央，如图 1。

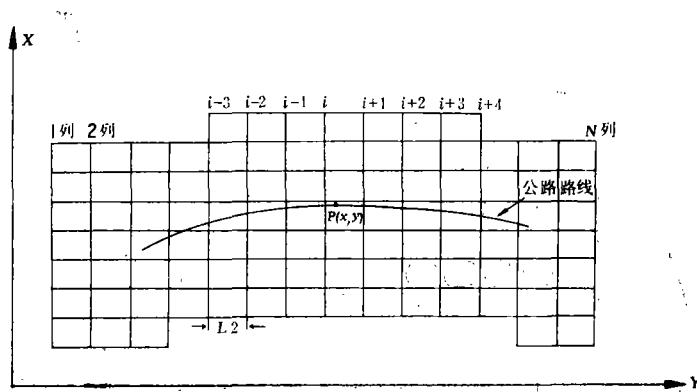


图 1

在初步设计中, 若采样格网边长在10~20米, 且地形不是很复杂时, 不必对格网进行内插加密。因而下述的内插功能是内插出现状纵断面、现状横断面上任意点的高程。在公路设计中, 常用的内插方法为移动拟合法, 如图 2 所示。以待插点  $P$  为圆心,  $R$  为半径, 当已知数据点与待插点之距  $d_i \leq R$  时, 则可用来内插  $p$  点。内插模型为

$$Z_i = A \bar{X}_i^2 + B \bar{X}_i \bar{Y}_i + C \bar{Y}_i^2 + D \bar{X}_i$$

$$+ E \bar{Y}_i + F,$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\bar{X}_i = X_i - X_p, \bar{Y}_i = Y_i - Y_p.$$

当圆内已知数据点数  $n > 6$  时, 可进行平差处理。误差方程为:

$$V_i = A \bar{X}_i^2 + B \bar{X}_i \bar{Y}_i + C \bar{Y}_i^2 + D \bar{X}_i$$

$$+ E \bar{Y}_i + F - Z_i,$$

权:  $P_i = a/d_i^2$ .

上式中  $a$  为权参数,  $d_i$  为距离。

进行内插时, 迅速地查找出已知数据点是提高运行速度的关键之一。针对前面建立的 DTM 的特点, 可以利用  $J_0, J_1$  二数值来判断。如图 1 所示, 格网 Y 方向边长为  $L_2$ , 待插点为  $P(x, y)$ , 第 1 列的 Y 坐标为  $Y(1)$ , 内插圆半径为  $R$ , 则

$$J_0 = \text{INT}((y - Y(1))/L_2),$$

$$J_1 = \text{INT}(R/L_2 + 1).$$

若  $J_0 = i, J_1 = 2$ , 则内插  $P$  点时, 只需在第  $i-2 \sim i+3$  列间查找内插的已知数据点, 而不必盲目地在其他列中查找, 这就大大节省了时间。

## 2 DTM 用于公路设计

公路设计主要涉及平面、纵断面、横断面、土方量、透视图 5 个方面。

在平面线型大体位置已定的情况下, DTM 用于公路设计, 主要表现在不必进行进一步野外测量的情况下, 由所建立的带状 DTM 内插出现状纵断面、现状横断面、计算机自动绘制公路路线平面地形图 (仅指等高线图, 限篇幅, 这部分不予介绍)。

### 2.1 平面曲线

公路的平面线形一般由直线、圆曲线、缓和曲线组成, 如图 3。

在平面线形的大体位置已定的情况下, DTM 的应用是有限的。平面曲线部分主要根据公路工程师提供的平面导线转折点坐标  $X_i, Y_i$ , 路线设计车速  $V$  及平面曲线设计半径  $R_i$ , 先求出缓和曲线长度  $L_i$  (也可由工程师定), 且根据坐标值、 $R_i$  及  $L_i$  判断所设计的平面曲

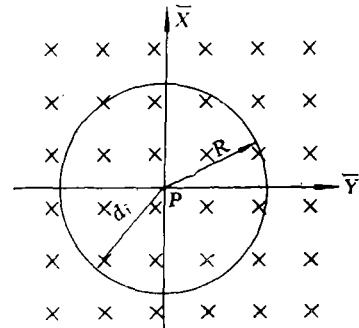


图 2

线是否会出现曲线错开的情况。

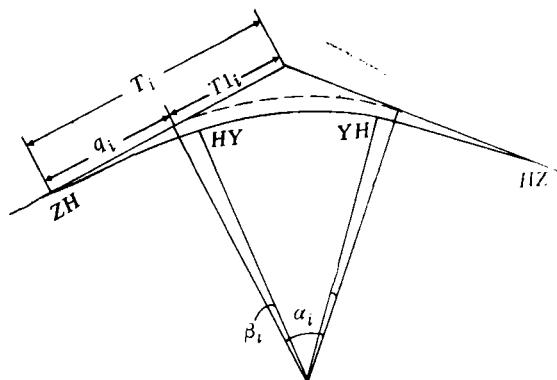


图 3

平面设计实质上就是解决圆曲线与缓和曲线的设置的问题。在  $V$ ,  $R$ , 及  $L_i$  确定后, 我们就可按一定公式算出缓和曲线切线增值  $q_i$ , 圆曲线内移值  $p_i$ , 不设缓和曲线时切线长  $T_{1i}$ , 总切线长  $T_i$  及平面导线方位角  $A_i$  等。此后, 为了能绘制出平面曲线和利用 DTM 能内插出现状纵断面上各分测点 (即曲线上一定间隔的点, 间隔的长度可视绘图要求而定) 的高程, 更为了横断面的处理及透视图坐标的获取, 必须求出平面曲线上各分测点的平面坐标及桩号里程, 即将平面曲线数字化。

## 2.2 纵断面

现行的纵断面设计方法, 是把沿路中心线测得的中桩地面高程绘制在坐标格网纸上, 以设计标准为依据, 对原地面线进行拉坡, 最后获得纵断面设计线。显然这种方法对计算机是不合适的。

将 DTM 及计算机引入公路纵断面设计, 其基本过程就是先根据平面曲线分测点的平面坐标, 利用带状 DTM, 采用移动拟合法内插出其高程, 这样就获得了现状纵断面。将所获得的现状纵断面以现行设计标准所规定的最小坡长, 作为起码的平滑范围进行处理。

所谓“平滑处理”就是以某种数学原理, 在满足一定约束条件下 (如坡度约束等), 来确定一个比原地面线更平顺的地面线, 方法可用直线拟合法, 如图 4 所示。直线方程为:

$$Z_i = a_i + b_i S,$$

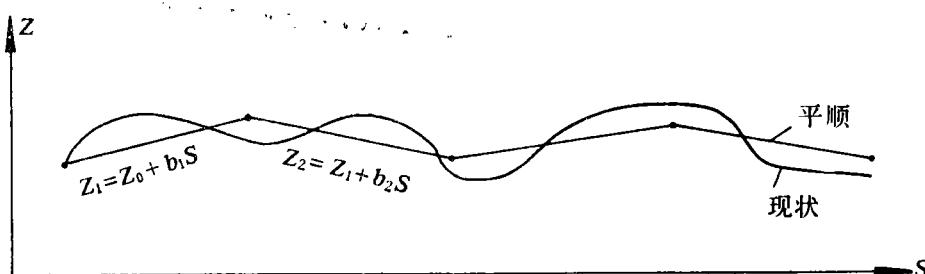


图 4

顾及段与段之间高程的连续性，则有

$$Z_{i+1} = Z_i + b_{i+1} \cdot S .$$

利用现状纵断面上分测点的内插高程 $Z$ 及桩号里程 $S$ ，即可用最小二乘法求出平滑线段的斜率即坡度 $b_i$ 。平滑时应顾及坡度最大、最小及坡长限制。当 $b_i$ 值大于纵坡值 $i_{max}$ 时，则令 $b_i = \text{sign}(b_i) \cdot i_{max}$ ；当 $|b_{i+1} - b_i| < D_w$ （最低限值）时，则令 $b_{i+1} = b_i$ ；当 $|b_i| < i_{min}$ 时，则 $b_i = \text{sign}(b_i) \cdot i_{min}$ ；当坡长超限时，则计算机显示信息，以便人工调节平滑范围。

在纵断面设计中，常常会因为设置桥梁、隧道或与铁路、公路相交，而提出标高控制要求，标高控制一般有以下几种形式：

上限控制： $H \leq H_1$  ( $H_1$  为控制点标高)；

下限控制： $H \geq H_2$  ( $H_2$  为控制点标高)；

门式控制： $H_2 \leq H \leq H_1$ ；

固定点控制： $H = H'$  ( $H'$  为固定点标高)。

我们可以调整初步纵断面的转坡点（即竖导线转折点）的桩号里程、标高和曲线半径，而使它满足所有的约束条件。约束检查是按转坡点逐个进行的，当在一个转坡点处基本约束一旦得到满足，该点就被固定。具体做法是按所设计的纵断面参数（即竖曲线半径、转坡点高程及桩号）算出附有标高控制处的高程，然后对照是否满足控制要求，若不满足，则调节转坡点位置或标高。转坡点标高变化了，则坡度也随之而变，因而必须重新计算坡度并进行坡度及坡长是否满足要求的检查。若坡长出现超限情况则显示出错信息，由人来调整转坡点位置或竖曲线半径。纵断面上任一点的设计高可由下式求得：

1. 纵断面直线部分：

$$Z = Z_i + \frac{Z_{i+1} - Z_i}{S_{i+1} - S_i} (S - S_i) , \quad (1)$$

2. 竖曲线的曲线部分：

$$Z = Z_i + \frac{b_{i+1} - b_i}{2 c_i} (S - S_i + \frac{c_i}{2})^2 + b_i (S - S_i) . \quad (2)$$

式中  $b_i$  为坡度， $c_i$  为圆弧。

若已知某点的标高控制高程值为 $Z$ ，桩号里程为 $S$ ，可按上述二关系式反算该竖曲线的转坡点的高程，按反算得的转坡点高程设计的纵断面，则此标高控制点的设计高必为 $Z$ ，从而达到了标高控制的要求。

平滑后的初始断面线，通过约束检查与标高控制的处理。所得的新的断面线，称之为“准纵断面线”，它是供纵断面优化设计的基本纵断面线。

同样，由 (1)，(2) 两式可算出纵断面上各分测点之设计高，从而达到纵断面设计计算与绘图。

### 2.3 横断面

路线任何地方的横断面并非都要提供，我们可根据现状纵断面图及地形图判断地形起伏的地方，从而提供这些地方的现状横断面图形，如图 5 所示。

进行横断面型式的设计、计算土石方、绘制横断面图均需要现状横断面。因此，如何获

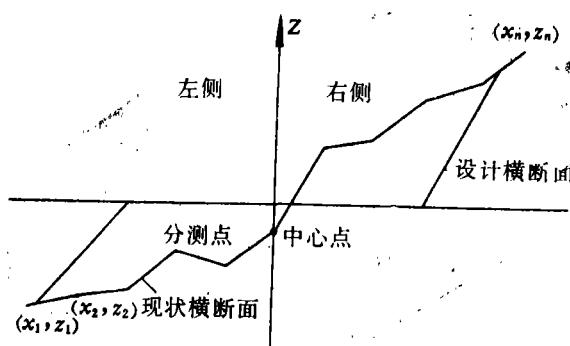


图 5

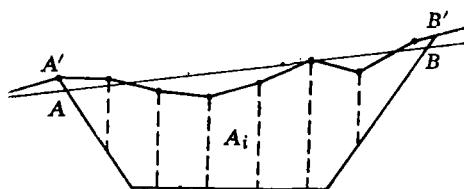


图 6

取现状横断面是问题的关键。DTM 的应用可以在不必进行更多的野外作业的情况下, 利用平面曲线点的坐标及参数求得现状横断面上各测点之平面坐标, 再在带状 DTM 中内插出高程即得现状横断面, 在此基础上即可进行设计及计算等一系列工作。

## 2.4 土方量计算

土方量是用于工程费用估算及方案选优的重要因素, 故公路工程必须计算土方量。可用平均断面法进行计算。

相邻断面间填(或挖)方体积公式:

$$V_i = ((A_1 + A_2) / 2) L_i, \\ V_{\text{总}} = \sum V_i,$$

式中  $A_i (i=1,2)$  为某横断面的填(挖)面积,  $L_i$  为相邻横断面路线长。关键是求  $A_i (i=1,2)$ 。

如图 6,  $A_i$  也就是各三角形和梯形的面积之和。关键是找出设计横断面线与现状横断面线交界点  $A', B'$ ,

而  $A', B'$  可用现状横断面线的拟合线与设计横断面线之交点  $A, B$  代替。这一近似仅影响二边缘三角形面积的计算, 但可满足公路设计精度要求。

## 2.5 透视图

透视图主要用于协调公路平面线形与纵面线形, 普遍用于研究线形的是驾驶人员透视图。

透视图也是中心投影, 故其计算原理与解析空中三角测量类同。而一般  $\varphi = 0$ , 视轴一般取水平, 即  $\omega = 0$ 。此时可得透视转换的坐标计算公式为:

$$X' = c \frac{(X - X_0) \cos k - (Y - Y_0) \sin k}{(X - X_0) \sin k + (Y - Y_0) \cos k},$$

$$Z' = c \frac{Z - Z_0}{(X - X_0) \sin k + (Y - Y_0) \cos k},$$

式中  $c$  为画面距离,  $X_0, Y_0, Z_0$  为视点坐标, 它可由立地点对应路中心点坐标经过平移而得,  $X, Y, Z$  则为透视图横断面对应的路中线点及二边缘点的三维坐标, 它们在已知路线平面曲线和纵断面曲线要素之后即可求得;  $k$  角利用平面曲线分测点坐标可得。这样, 在求得  $X', Z'$  之后, 即可获得绘制某处透视图的数据了。

### 3 试 验

原始资料: 原始地形图比例尺 1/2000, DTM 格网取样边长为 10 米, 平面导线布设如图 7 所示。 $R_{\text{平}} = 1200$  米,  $L_i = 100$  米,  $R_{\text{竖}} = 15000$  米, 路宽 12.5 米。经过一系列的计算与处理, 绘制出平面曲线、纵断面图、横断面图、透视图分别为图 8 ~ 图 11。(限于篇幅 仅画出示意图, 且平面曲线图、纵断面图上仅注记出一点相应数据。)

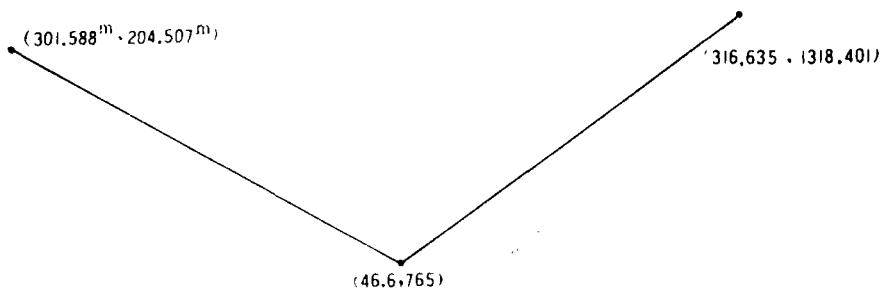
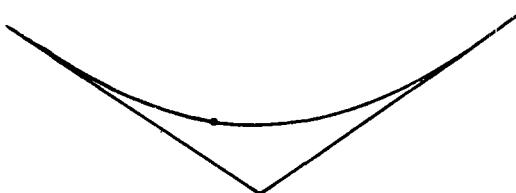


图 7



Y	...	624.95	...
X	...	179.71	...

图 8

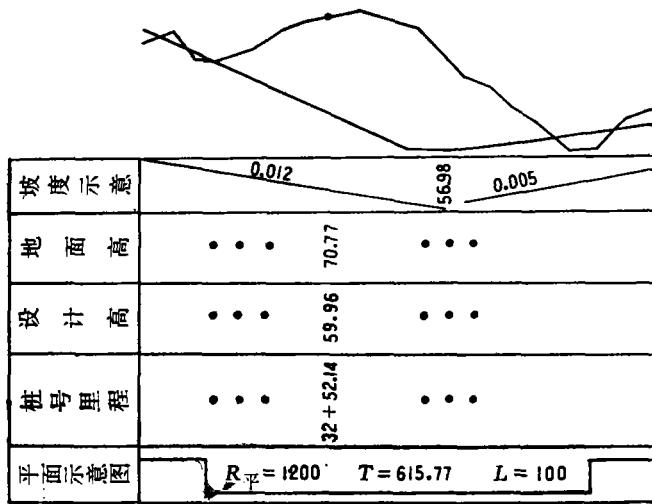


图 9

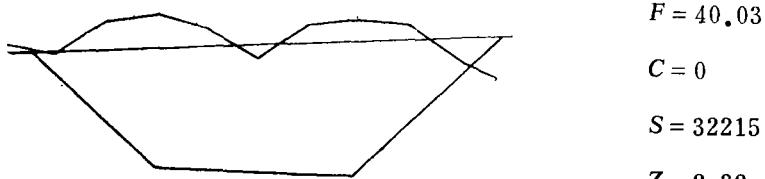


图 10



图 11

#### 4 结论与建议

DTM 的建立与应用的研究是一个具有较强理论性与实用性的课题，它用于公路勘测设计在国内的研究还处于初始阶段。本文的探讨可得如下结论及建议：

1. DTM用于公路设计是完全必要和可行的，且大有潜力可挖；
2. 应根据原始资料的获取，以不同方式建立满足公路设计需要的经济实用的DTM；
3. DTM 数据中应收集地质、水文、地物信息，并开发利用领域。

## 参 考 文 献

- [1] 王之卓。摄影测量原理。测绘出版社，1979。
- [2] 何景华主编。公路勘测设计。人民交通出版社，1983。
- [3] 同济大学等五院校。道路工程制图。人民交通出版社，1979。

# Application of Digital Terrain Model

## in the Design of Highways

*Huang Guilan*

### Abstract

Economic development necessarily requires changes to be made in highway planning and the means of surveying and designing in highway building. To speed up the designing process in highway construction, one mainly depends upon automation, in which the digitization of terrain information (or DTM) is an indispensable part. This paper established a DTM which has taken highway designing and the characteristics of a linear project into consideration in terms of sampling and data processing. It gives a man-machine interactive designing profile and programmes for computing the cubic meters of earthwork and stonework of different geological structures and for drawing profiles, plans, the cross sections of specific piles, and perspective graphs of any length. At the end of the paper, experimental data have been given to show the correctness of the programmes. The results indicate that the application of DTM in highway designing is not only feasible but has great potentiality.

**【Key words】** digital terrain model; profile; cross section; perspective graph